

SISTEMA DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS A CORTO PLAZO PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA Y BALEARES

D. SANTOS-MUÑOZ⁽¹⁾, M. L. MARTIN⁽²⁾, A. MORATA⁽³⁾, M.Y. LUNA⁽³⁾, F. VALERO⁽¹⁾,
A. PASCUAL⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dpto. Astrofísica y CC. de la Atmósfera. Facultad de CC. Físicas. Universidad Complutense de Madrid. Spain

e-mail: dsantos@fis.ucm.es, valero@fis.ucm.es, a.depascual@fis.ucm.es

⁽²⁾ Dpto. Matemática Aplicada. Escuela Universitaria de Informática de Segovia. Universidad de Valladolid, Pza. Sta. Eulalia, 9-11, 40005 Segovia. Spain.

e-mail: mlmartin@eis.uva.es

⁽³⁾ Agencia Estatal de Meteorología. Leonardo Prieto Castro, 8. 28040 Madrid. Spain.

e-mail: yluna@inm.es, abmorata@inm.es

RESUMEN

Se ha desarrollado un sistema de predicción por conjuntos generando predicciones probabilistas a corto plazo del campo de precipitación para la Península Ibérica y las Islas Baleares. El sistema está basado en la quinta generación del modelo desarrollado en colaboración entre la Universidad de Pennsylvania State y el National Center for Atmospheric Research (MM5). El sistema se fundamenta en la combinación de dos condiciones iniciales y de contorno provenientes de dos modelos globales, IFS-ECMWF y GFS-NCEP, con cinco configuraciones de parametrizaciones físicas de los fenómenos de sub-rejilla del modelo. De este modo se han obtenido diez miembros del sistema para llevando a cabo un conjunto de integraciones para el mes de octubre del año 2006. El sistema ha sido verificado mediante el contraste de las predicciones con los valores observados de precipitación de la Red Climática Española.

La calidad del sistema de predicción por conjuntos se evalúa mediante diagramas dispersión-pericia mostrando alta correlación para valores de precipitación diaria. El histograma de rango o diagrama de Talagrand indica por su forma un comportamiento infradispersivo y afectado por sesgo del sistema. El área bajo las curvas R.O.C. indica buena capacidad de discriminación del sistema. Los diagramas de atributos revelan buena fiabilidad del sistema, sugiriendo, en general, un buen grado de acuerdo entre las probabilidades predichas y las frecuencias promedio observadas. Por todo ello, el sistema se muestra como una herramienta útil para la predicción de la precipitación en el área de estudio.

1. INTRODUCCIÓN

La predicción de la ocurrencia y localización de eventos de fuerte precipitación pueden ser mejorada mediante el uso de las predicciones numéricas del tiempo a corto plazo. A pesar de que los modelos numéricos deterministas son capaces de producir predicciones razonablemente precisas, existen fuentes de error que reducen la calidad de las mismas y la confianza en los campos simulados. Estas fuentes de error pueden ser forzamientos atmosféricos incluidos de forma poco precisa en el modelo, escaso conocimiento de las condiciones atmosféricas iniciales incluyendo errores instrumentales en la toma de datos, errores de muestreo y en el proceso de inicialización del modelo, y limitaciones debidas a la no linealidad del sistema atmosférico (Stensrud et al., 2000). Además, pequeños errores o perturbaciones en las condiciones iniciales son amplificadas según se incrementa el periodo de predicción, dando lugar a diferencias destacables en las predicciones. Es por esto que, las predicciones pueden ser mejoradas mediante la generación de diversas predicciones a partir de condiciones iniciales ligeramente diferentes con alto grado de equiprobabilidad de ser reales (Toth and Kalnay, 1997). La técnica de los sistemas de predicción por conjuntos (SCP) puede representar una clara mejora respecto a las predicciones individuales de carácter determinista, añadiendo información sobre la incertidumbre y fiabilidad de las predicciones. La utilidad de los SPC reside en la diversidad de soluciones plausibles que el sistema produce para la predicción de una situación atmosférica. Las diferencias entre los miembros del sistema pueden ser caracterizadas por la varianza de los mismos respecto a la media del sistema y son representados en los gráficos dispersión-pericia. Si las predicciones son muy similares, esto es con poca

dispersión, el sistema indica que la situación atmosférica es más predecible que si las predicciones son más dispares o lo que es lo mismo tienen mucha dispersión. Entonces, si los resultados muestran pequeña dispersión y la relación dispersión-pericia del sistema es óptima, las predicciones tendrán un alto grado de validez al tener un alto grado de pericia.

En este trabajo se ha desarrollado un SPC para la obtención de predicciones a corto plazo sobre la Península Ibérica y Baleares basado en un conjunto de modelos de mesoescala con diferentes parametrizaciones físicas de fenómenos subrejilla y dos condiciones iniciales. Se ha construido un SPC formado por diez miembros como resultado de la combinación de dos condiciones iniciales procedentes de dos modelos globales y cinco configuraciones del modelo no hidrostático Mesoscale Model (MM5, versión 3). Las simulaciones del sistema han sido generadas y evaluadas para la precipitación durante el mes de octubre del año 2006. La calidad de las predicciones de la precipitación han sido contrastadas mediante la comparación con las observaciones de la Red Climática de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las comparaciones entre el sistema y las observaciones proporcionan una visión general de la calidad promedio y la variabilidad de la precisión del sistema. Además, las distribuciones de probabilidad de precipitación aportarán información sobre la incertidumbre de las predicciones realizadas por el sistema. Tanto los métodos de verificación espacial como probabilistas permitirán tanto verificar individualmente los miembros del sistema como las distribuciones de probabilidad.

La organización de este artículo es la siguiente: la Sección 2 describe la base de datos de precipitación usada en la verificación de las predicciones del sistema; la Sección 3 describe el sistema y las configuraciones y parametrizaciones físicas seleccionadas para la obtención de los miembros. La verificación de las diversas propiedades del sistema respecto a la predicción de la precipitación son examinadas en la Sección 4. Finalmente las principales conclusiones obtenidas en el presente estudio son presentadas en la Sección 5.

2. BASE DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

La calidad de las predicciones de precipitación ha sido evaluada respecto a la Red Climática de la AEMET. El Servicio de Climatología de la AEMET ha elaborado una base de datos de precipitación diaria partiendo de datos observacionales de la red mediante interpolación estadística de más de 4000 observaciones a una rejilla regular. El propósito de la generación de esta base de datos regularmente espaciada fue la descripción de la variabilidad climática diaria de la precipitación, para lo cual se ha dispuesto de medidas in-situ de la Base de

Datos Históricas para el periodo que va desde el 1 de enero de 1931 hasta el 31 de diciembre de 2008. Esta base de datos tiene distinto número de observaciones para cada fecha (Fig. 1), pero independientemente de esto se ha realizado el mismo tratamiento de interpolación para todos los días comprendidos en la base de datos.

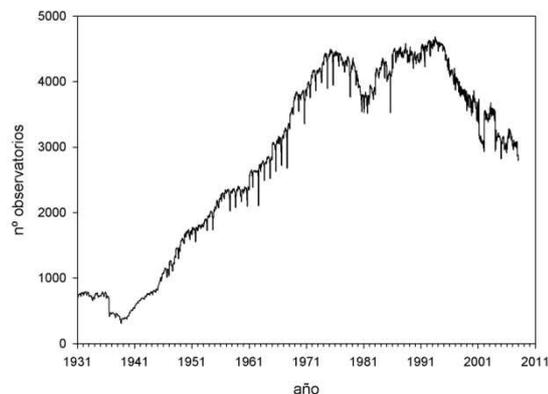


Fig 1.- Evolución del número de observatorios utilizados en la generación de la Base de Datos de Precipitación de la AEMET.

Las estaciones están irregularmente distribuidas por la Península Ibérica y Baleares pero proporcionan una buena cobertura en toda el área que se muestra en la Fig. 2. Para completar las observaciones sobre Portugal se usaron datos del proyecto European Climate Assessment & Dataset (ECA&D, Haylock et al., 2008).

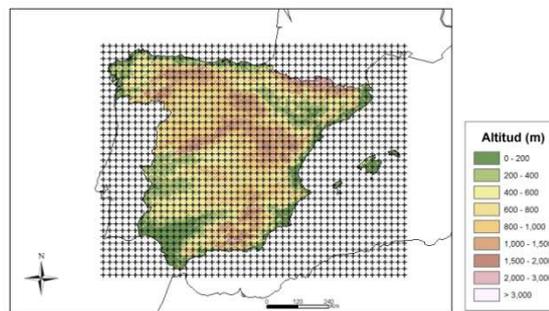


Fig. 2.- Disposición espacial de los puntos en la rejilla de 25 km.

La AEMET utiliza una rejilla regular de 25 km de resolución (Fig. 2) dado que esta resolución espacial es adecuada para los modelos de análisis de riesgos y los estudios de variabilidad climática incluyendo la determinación de los posibles impactos del cambio climático sobre España. El método geoestadístico utilizado para llevar a cabo la interpolación fue el Kriging debido a que preserva mayor cantidad de varianza original de los datos observados que otros métodos estadísticos (Shen et al., 2001). Esta técnica se encuentra implementada en todos los Sistemas de Información Geográfica utilizados para el análisis

espacial. Además, el Kriging es ampliamente utilizado en otros países de nuestro entorno, permitiendo comparaciones entre bases de datos. Todas estas consideraciones se subrayan en los objetivos de la Acción COST719 (The use of GIS in Meteorology and Climatology) en la que participa activamente la AEMET. Mayor información sobre esta base de datos puede encontrarse en Luna y Almarza (2007).

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS A CORTO PLAZO

Para la generación de un SPC a corto plazo se ha seleccionado el modelo no hidrostático Mesoscale Model (MM5 version 3), desarrollado entre la Universidad de Pennsylvania State y el National Center of Atmospheric Research (Anthes and Warner, 1978; Grell et al., 1994). Para llevar a cabo este estudio se han combinado cinco parametrizaciones físicas y dos conjuntos de condiciones iniciales y de contorno.

Todos los miembros del sistema usan la coordenada vertical σ que tiene la propiedad de seguir las irregularidades del terreno. En este caso se han seleccionado 30 niveles verticales no equiespaciados, presentando una mayor densidad de los mismos en la baja troposfera de tal modo que se obtenga una mejor representación de los procesos que tienen lugar en la capa límite planetaria. El sistema se integró con una estrategia de anidamiento bidireccional con un dominio espacial de 30 km de resolución horizontal que comprende toda la Península Ibérica y gran parte del Oeste de la cuenca mediterránea así como parte del Este del Atlántico. Anidado a este se situó un dominio de 10 km de resolución horizontal que cubre todas la Península Ibérica y Baleares (Fig. 3).



Fig. 3.- Cobertura geográfica de las simulaciones de MM5 para el SPC a corto plazo

Dependiendo de la configuración del miembro del sistema el paso de tiempo del modelo ha sido establecido entre 35 y 240 s. Dos conjuntos de datos

han sido utilizados como condiciones iniciales y de contorno para la generación de los miembros del sistema: el análisis y las predicciones del IFS-ECMWF (0.5° x 0.5 ° de resolución espacial, 21 niveles isobáricos verticales) y el análisis y las predicciones del modelo GFS-NCEP(1.0° x 1.0° de resolución espacial, 26 niveles isobáricos verticales). El procedimiento de la integración de los miembros se inicializa mediante una interpolación bilineal de los datos de análisis de los modelos globales, mientras que como condiciones de contorno se utilizan las predicciones generadas por el modelo global a partir de su propio análisis. Los miembros resuelven los procesos en el interior de los dominios mediante una anidamiento bidireccional que permite el flujo de los efectos de los fenómenos atmosféricos dependientes de la resolución entre ambos dominios. El periodo de estudio ha sido simulado mediante una integración diaria inicializada las 00 UTC y con un alcance máximo de predicción de 36 horas. Tanto las áreas de integración como la longitud de las predicciones han sido seleccionadas para evitar efectos perniciosos de las condiciones de contorno en las probabilidades generadas por el sistema (Warner et al., 1997).

Las incertidumbres relacionadas con el modelado de los procesos de subrejilla han sido incorporadas en el sistema mediante el uso de diversas parametrizaciones físicas. La variación de las parametrizaciones de la convección y de la capa límite planetaria permitieron genera soluciones plausibles y realistas, ayudando a evaluar la predicibilidad de las situaciones atmosféricas simuladas. Se han utilizado tres esquemas de convección: el esquema de Grell (Grell et al., 1994) de la configuración por defecto, el esquema de Betts-Miller (Betts and Miller, 1986) y el de Kain-Fritsch (Kain and Fritsch, 1990). Para la incorporación de las incertidumbres en los procesos de capa límite se ha hecho uso del esquema por defecto MRF (Hong and Pan, 1996), del esquema de Mellor-Yamada-Janjic (Janjic and Zavisla, 1994) y del esquema de Gayno-Seaman (Shafran et al., 2000). Por otra parte el resto de parametrizaciones físicas (procesos microfísicos y los efectos del suelo) han generado mayores dispersiones en las funciones de densidad de probabilidad incluso habiendo usado el mismo modelo. Teniendo esto en cuenta y debido a restricciones de compatibilidad entre las parametrizaciones, se han usado tres esquemas de microfísica: el de defecto, el esquema Reisner-2 (Reisner et al., 1998) y el esquema de Goddar (Lin et al., 1983; Tao et al., 1989, 1993) ; y dos esquemas de procesos de suelo: el esquema de cinco capas y el esquema de NOAH (Chen and Dudhia, 2001). Excepto los miembros que usan la combinación de parametrizaciones por defecto , el resto parametriza la radiación mediante un modelo de transferencia radiativa (RRTM) descrito en Mlawer et al. (1997). La Tabla 1 muestra los dos conjuntos de modelos,

cinco que utilizan el IFS-ECMWF (denotados como XXE) como método de inicialización y de condiciones de contorno; y los cinco que utilizan el modelo GFS-NCEP (XXN) para inicializarse.

| NAME | CUMULUS | PBL | MICROPHYSICS | RADIATION | LAND SURFACE | SOIL LEVELS |
|------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|---------------|
| DFE | Grell | MRF | SIMPLE ICE | CLOUD | 5LAYER | 7,28,100,255 |
| BEE | Betts-Miller | MYJ | REISNER | RRTM | NOAH | 7,28,100,255 |
| KEE | Kain-Fritsch | MYJ | REISNER | RRTM | NOAH | 7,28,100,255 |
| BGE | Betts-Miller | GAYNO-SEAMAN | GODDARD | RRTM | 5LAYER | 7,28,100,255 |
| KGE | Kain-Fritsch | GAYNO-SEAMAN | GODDARD | RRTM | 5LAYER | 7,28,100,255 |
| DFN | Grell | MRF | SIMPLE ICE | CLOUD | 5LAYER | 10,40,100,200 |
| BEN | Betts-Miller | MYJ | REISNER | RRTM | NOAH | 10,40,100,200 |
| KEN | Kain-Fritsch | MYJ | REISNER | RRTM | NOAH | 10,40,100,200 |
| BGN | Betts-Miller | GAYNO-SEAMAN | GODDARD | RRTM | 5LAYER | 10,40,100,200 |
| KGN | Kain-Fritsch | GAYNO-SEAMAN | GODDARD | RRTM | 5LAYER | 10,40,100,200 |

Tabla 1: Descripción de las parametrizaciones físicas utilizadas por cada uno de los miembros del sistema. Los miembros denotados como XXE han sido inicializados con el modelo IFS-ECMWF y los denotados como XXN han sido inicializados con GFS-NCEP.

4. RESULTADOS

En esta sección se muestra el comportamiento de las simulaciones realizadas mediante los diez miembros del sistema en el dominio de alta resolución para el periodo del mes de octubre del año 2006. Se describirán tanto los resultados de la verificación espacial como la probabilista. En la Fig 4 se representan el sesgo promedio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) de la precipitación acumulada en 24 horas en una rejilla regular (25 km x 25 km) para poder hacer compatible la resolución espacial de las predicciones y los datos observacionales. Para este propósito, se ha realizado una interpolación de los datos previstos por el sistema en un radio de 5 km alrededor del punto observacional. A través de todo el periodo de estudio el sesgo y la RECM (Fig. 4a y b) presentan una evolución similar entre todos los miembros del sistema. Cabe destacar la presencia de comportamientos diferentes en el periodo de estudio (Fig. 4a) en la mayoría de los casos se produce un sesgo húmedo, mientras que solo en casos discretos este sesgo es seco. Estos sesgos pueden ser indicativos de una sobrepredicción en el caso del sesgo húmedo e infrapredicción en el caso del seco. La media del sistema (MSPC) produce una buena predicción cuando se compara con el resto de los miembros del sistema; de hecho, cuando el periodo modelizado es lo suficientemente largo, la MSPC es la mejor de las predicciones desde el punto de vista de la verificación estadística espacial. En el caso del presente trabajo la MSPC es el mejor de los miembros.

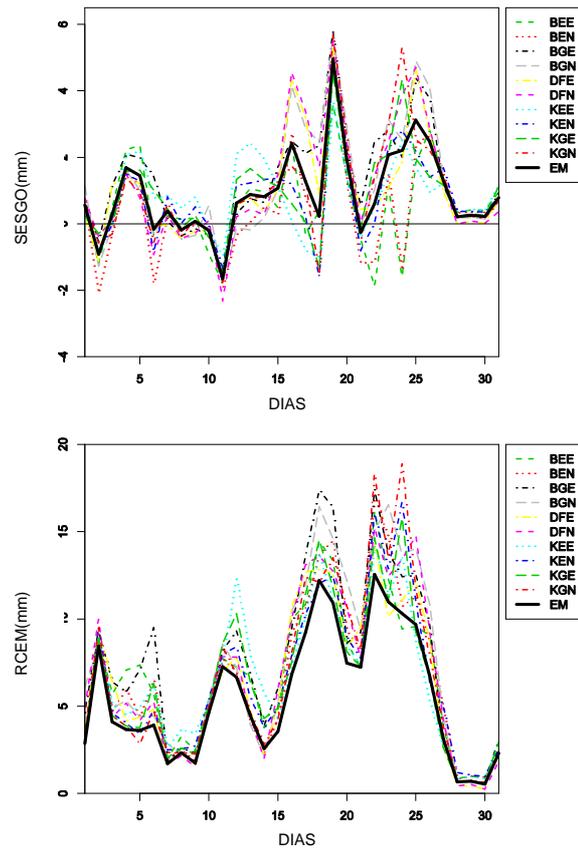


Fig. 4.- Evolución temporal del sesgo (a) y de la RECM para cada uno de los miembros y de la media del sistema de la precipitación diaria, promediando en todo el área. Unidades mm/m².

Para determinar si el sistema está calibrado resulta útil comparar la existencia de una relación lineal entre la dispersión de los miembros y la RECM de la media del ensemble. La Fig. 5 muestra la representación de los 31 valores de la dispersión de los miembros respecto a la RECM de la media. La correlación lineal de los mismos es de 0.8608 indicando menor dispersión que el error de la media, y por tanto un comportamiento infradispersivo del sistema.

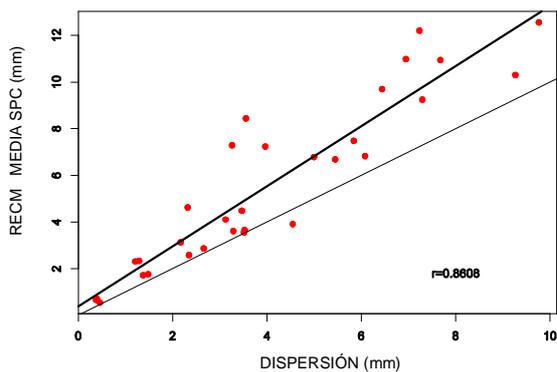


Fig. 5.- Representación de los 31 valores de la dispersión de los miembros respecto a la RECM de la media. El coeficiente de correlación lineal de los mismos es de 0.8608

En el histograma de rango o diagrama de Talagrand (Anderson, 1996; Talagrand et al., 1998) se representan las frecuencias de los rangos de los datos observacionales respecto a los miembros del SPC. Esto es, en el diagrama de Talagrand se representa el número de veces que la observación verificante cae en cada uno de los intervalos resultantes de la ordenación de menor a mayor de las predicciones realizadas por los miembros en cada uno de los puntos de la rejilla. En un SPC con dispersión perfecta, cada uno de los miembros representa un escenario equiprobable por lo que la observación tendría la misma probabilidad de caer entre cualquiera de los intervalos definidos por los miembros, generando un histograma plano para el conjunto de observaciones verificantes. La obtención de un histograma plano solo es indicativo de la equiprobabilidad e indistinguibilidad de los miembros, pero no de la pericia del sistema, pero un buen SPC ha de tener un histograma lo más plano posible para representar de forma correcta la incertidumbre de las predicciones. Por lo tanto un diagrama de Talagrand plano es indicativo de la indistinguibilidad de las predicciones y las observaciones, siendo pues las predicciones una buena representación de la distribución real del suceso a predecir. En el caso de que la forma del histograma fuese de U invertida, es indicativo de una demasiada dispersión del sistema ya que el rango de las observaciones se constriñe a los intervalos medios quedando muy pocas observaciones en los intervalos abiertos de los extremos resultantes de la ordenación de los miembros. Al contrario, si el histograma tiene forma de U el sistema adolece de dispersión suficiente para representar de forma correcta la incertidumbre de las predicciones. En algunos casos, esta forma de U degenera en una U asimétrica siendo indicativa de que el sistema, además de infradispersión, está afectado de sesgo.

La Fig. 6 muestra el histograma de rangos para la precipitación diaria en el mes de octubre de 2006. La forma de U asimétrica es indicativa de que el sistema adolece de sesgo, siendo ligeramente infrapredictivo y altamente sobrepredictivo sobre todo en los primeros intervalos. Esto es debido a la deficiencia de dispersión del sistema así como a las características propias de la precipitación, al ser una variable definida positiva con alto número de casos de precipitación nula, hacen que la mayoría de los sistemas tiendan a una sobrepredicción en los casos de predicciones bajas o nulas, mientras se produce una infrapredicción de los casos con precipitaciones máximas.

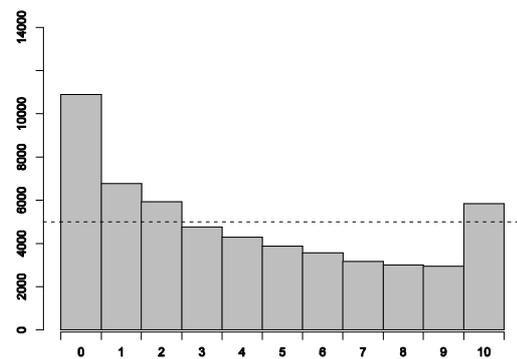


Fig. 6.- Histograma de rangos para la precipitación diaria en el mes de octubre de 2006. La línea en trazo discontinuo indica la equiprobabilidad de los miembros.

La discriminación para una predicción puede ser definida como la capacidad de esta en discernir entre los sucesos que tienen lugar y los que no. Esta característica de las predicciones puede ser medida mediante las curvas de *Relative Operating Characteristics* o curvas ROC (Mason, 1982). Estas curvas se generan mediante la representación de la tasa de acierto frente a la de falsas alarmas para cada una de las frecuencias de probabilidad predichas fijando diversos umbrales de la variable a predecir. De tal modo que cuanto más cercano es el punto en la grafica a la esquina superior izquierda del gráfico, mayor será el grado de aciertos respecto al de falsas alarmas, siendo pues un sistema con alto grado de discriminación. En el caso de que los puntos tendieran a la esquina inferior derecha sería indicativo de un bajo número de aciertos y un alto número de falsas alarmas, indicando una mala discriminación del sistema. Todo este comportamiento puede ser resumido por el área delimitada por la curva resultante de unir los puntos para las diversas probabilidades de predicción, conocida como área ROC. La Fig. 7 muestra la curva ROC para el umbral fijado como dos veces la desviación estándar (2σ) de los valores observados de precipitación en el mes de octubre (17.29 mm/m^2 en 24 horas). El valor del área ROC es de 0.8878 siendo indicativo de un alto grado de discriminación

del sistema pese a estar afectado de sesgo como indica el diagrama de Talagrand (Fig. 6).

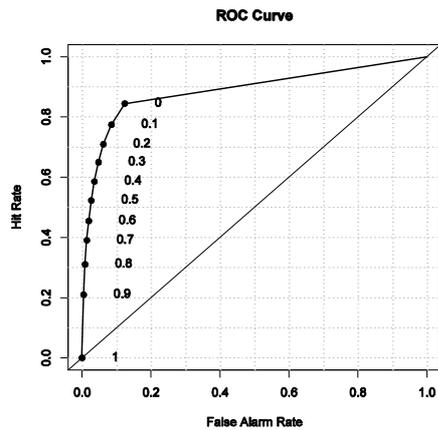


Fig. 7.- Curva ROC para la precipitación para el umbral fijado como dos veces la desviación estándar de los valores observados de precipitación en el mes de octubre (17.29 mm/m^2 en 24 horas).

Para estimación del grado de fiabilidad del sistema, es decir el grado de similitud de las probabilidades de predicción con las frecuencias de observación, se representan los diagramas de atributos (Hsu and Murphy, 1995). En estos diagramas se representa la frecuencia observada respecto a la probabilidad predicha para todas la categorías de probabilidad fijado un umbral de predicción de la variable a predecir. Además se representan dos rectas que muestran las llamadas líneas de no resolución, una horizontal y otra vertical, que corresponden a la frecuencia de la climatología muestral del suceso usado como referencia en el cálculo del índice de Brier (IB; Brier, 1950), y una línea que es la bisectriz entre la línea $y = x$ y la línea horizontal de no resolución. Esta última línea es conocida como línea de no pericia y refleja los puntos donde las componentes del resolución y fiabilidad IB del son iguales, por tanto, por encima de ella la componente de resolución es mayor que la de fiabilidad y como consecuencia se obtendrán Índices de Pericia de Brier (IPB) mayores que cero. Esta línea de no pericia es una construcción artificial, relacionada con la descomposición del IB (Murphy, 1973) y no implica que la información obtenida de sistemas con que curvas por debajo de la línea de no pericia sea de utilidad. El requerimiento de que la curva de fiabilidad esté por encima de la línea de no pericia está relacionado con que el IB es un índice equitativo (Gandin and Murphy, 1992; Mason, 2004). Esta propiedad del IB implica que se obtiene el mismo valor para predicciones constantes de una misma categoría o predicciones aleatorias. Predicciones con término de resolución distinto de cero son potencialmente útiles, y cualquier curva de fiabilidad con pendiente positiva indica una buena predicción. Además en el diagrama de fiabilidad se añaden los valores de la frecuencia con la que se predicen cada

una de las categorías, siendo indicativos del grado de definición del sistema y indicando cuales de las probabilidades contribuyen más en el cálculo del IB. La Fig. 8 representa el diagrama de atributos para el umbral de 2σ . La línea que representa la fiabilidad del sistema está por encima de la línea de no pericia para todas la categorías de probabilidad predichas, dando cuenta de un alto grado de fiabilidad del sistema. Los valores de las frecuencias de cada una de las categorías de predicción indican numéricamente, siendo la probabilidad del 0 % con una frecuencia del 0.833 la que tiene una mayor contribución en el cálculo del IB 0.833.

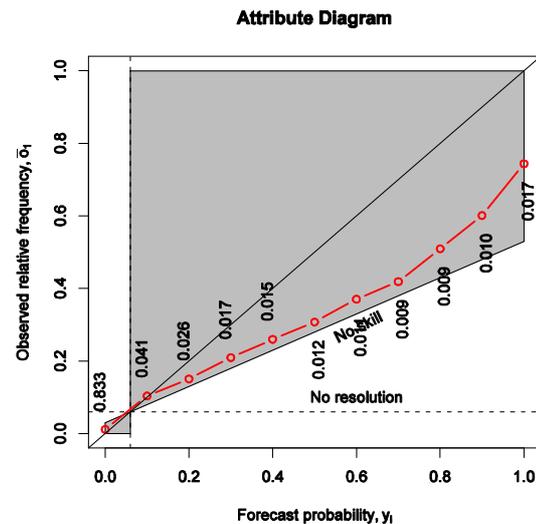


Fig. 8.- Diagrama de atributos para el umbral de 2σ . En valor numérico se indican los valores del histograma de definición.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una revisión de un SPC para la generación de predicciones probabilistas a corto plazo del campo de precipitación para la Península Ibérica y las islas Baleares durante el mes de octubre de 2006. El sistema está constituido por diez miembros del modelo MM5 que han resultado de la combinación de dos condiciones iniciales y de contorno provenientes de dos modelos globales, IFS-ECMWF y GFS-NCEP, con cinco configuraciones de parametrizaciones físicas de los fenómenos de sub-rejilla del modelo. La variación de las parametrizaciones de la convección y de la capa límite planetaria permitieron generar soluciones plausibles y realistas, ayudando a evaluar la predicibilidad de las situaciones atmosféricas simuladas.

La verificación mesoescalar del sistema se ha llevado a cabo mediante el contraste de las

predicciones con los valores observados de precipitación de la Red Climática Española.

La calidad del sistema de predicción por conjuntos se evalúa mediante los diagramas dispersión-pericia mostrando alta correlación para los valores de precipitación diaria. El histograma de rango o diagrama de Talagrand indica por su forma un comportamiento infradispersivo y afectado por sesgo del sistema. El área bajo las curvas R.O.C. indica buena capacidad de discriminación del sistema. Los diagramas de atributos revelan buena fiabilidad del sistema, sugiriendo, en general, un buen grado de acuerdo entre las probabilidades predichas y las frecuencias promedio observadas. Por todo ello, el sistema se muestra como una herramienta útil para la predicción de la precipitación en el área de estudio.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos de investigación CGL2011-25327, AYA2011-29967-C05-02 y VA025A10-2. Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) la cesión de los datos de precipitación utilizados. Así mismo, agradecen al NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center de Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov>) por proporcionar los datos de Reanálisis NCEP y al European Centre for Weather Medium Forecast (ECWMF) por proporcionar los datos de análisis y de predicción IFS-ECMWF. Los autores agradecen la información relativa al MM5 que UCAR proporciona on-line en <http://www.mmm.ucar.edu/mm5>.

6. REFERENCIAS

Anderson, J. L. (1996). A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations. *J. Climate*, 9, 1518-1530.

Anthes, R.A. and T.T. Warner (1978). Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1054-1078.

Betts, A.K. and M.J. Miller (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693-709.

Brier, G. W. (1950). Verification of forecast expressed in terms of probability. *Mon. Wea. Rev.*, 78, 1-3.

Chen, F. and J. Dudhia (2001). Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569-585.

Gandin, L. S., and Murphy, A. H. (1992). Equitable scores for categorical forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 361-370.

Grell, G.A., J. Dudhia and D.R. Stauffer (1994). Diagnosing coupled jet streak circulations for a northern plains snow band from the operational nested-grid model. *Wea. Forecast.*, 7, 26-48.

Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones and M. New (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.

Hong, S. Y., & Pan, H. L. (1996). Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.

Hsu, W.-R., & Murphy, A. H. (1986). The attributes diagram. A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts. *Int. J. Forecasting*, 2 (3), 285-293.

Janjic, J. and I. Zavisla (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.

Kain, J.S. and J.M. Fritsch (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784-2802.

Lin, Y. L., Farley, R. D., and Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, 1065-1092.

Luna, M. Y. and C. Almarza (2007). Interpolation of 1961-2002 daily climatic data in Spain. In *Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology*. Ed. by S. Szalai, Z. Bihari, T. Szentimrey and M. Lakatos. COST Office (ISBN 92-898-0033-X), 189-196.

Mason, S. J. (2004). On using “climatology” as a reference strategy in the Brier and ranked probability skill scores. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1891–1895.

Mason, S. J., & Graham, N. E. (1982). Areas beneath the relative operating characteristics (ROC) and relative operating levels (ROL) curves. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 30, 291-303.

- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, J., M., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663-16682.
- Murphy, A. H. (1973). A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, 12, 595-600.
- Reisner, J., R.M. Rasmussen and R.T. Bruintjes (1998). Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1071-1107, 1998.
- Shafran, P.C., N.L. Seaman and G.A. Gayno (2000). Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake-Michigan Ozone Study. *J. Appl. Meteor.*, 39, 412-426.
- Shen, S. P., Dzikowski, P., LI G. and Griffith D., 2001. Interpolation of 1961–97 daily temperature and precipitation data onto Alberta Polygons of ecodistrict and soil landscapes of Canada. *J. Appl. Meteor.*, 40, 2162-2177.
- Stensrud, D.J., J.W. Bao & T.T Warner (2000). Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2077-2107.
- Talagrand, O., Vautard, R., & Strauss, B. (1998). Evaluation of probabilistic prediction systems. *Proceedings, ECMWF Workshop on Predictability*, 20-22 October 1997, (págs. 1-25).
- Tao, W. K., & Simpson, J. (1993). Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model Description. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 4, 35-72.
- Tao, W. K., J. Simpson, J., & McCumber, M. (1989). Ice-water saturation adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231-235.
- Toth, Z. & E. Kalnay (1997). Ensemble forecasting at NCEP: The breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3297-3318.
- Warner, T., Peterson, R. A., & Treadon, R. (1997). A Tutorial on Lateral Boundary Conditions as a Basic and Potentially Serious Limitation to Regional Numerical Weather Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2599–2617.